

ОСОБЕННОСТИ НАВЕДЕНИЯ БОРТОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС¹

Рассматриваются особенности использования бортовых лазерных систем для периодической юстировки радиотехнических каналов измерения дальности контрольных станций спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: бортовая лазерная система, бортовой комплекс управления, наземный комплекс управления, радиочастотный канал, квантово-оптическая станция.

Квантово-оптические станции (КОС) предназначены для периодической юстировки радиотехнических каналов измерения дальности контрольных станций (КС) с помощью лазерного дальномера. В этих целях на каждом спутнике размещены специальные лазерные отражатели. Применение КОС обеспечивает высокоточное измерение параметров движения спутников ГЛОНАСС. В РФ разработаны три лазерные станции слежения, или КОС: лазерная дальномерная система «Гео-ИК»; КОС «Эталон»; КОС «Майданак».

Всего в России было сооружено 20 таких комплексов. Станция «Гео-ИК» является частью спутниковой геодезической системы «Гео-ИК», которая используется для определения земных координатных систем и моделей гравитационного поля Земли. Эти модели являются основой для высокоточных определений орбит спутников ГЛОНАСС.

Квантово-оптические станции типа «Эталон» и «Майданак» используются для корректировки радиолокационных измерений и в процессе определения орбит в ГЛОНАСС. Второе поколение КОС «Эталон» позволяет определять положение спутников, видимых по отраженному вниз солнечному свету (со звездной величиной менее чем 13), на максимальной высоте 20 000 км. Погрешность измерений дальности при интервале усреднения в 15 с составляет около 1,5...2 см, а углового положения – 2...3".

Квантово-оптическая станция «Майданак» представляет собой multifunctional комплекс, который позволяет измерять дальность до космических объектов на высотах до 40 000 км (со звездной величиной 16). Максимальная угловая ошибка определения положения спутника имеет порядок от 0,5 до 1...2", а дальномерная ошибка – не более 1,5...1,8 см. Наиболее эффективно лазерные станции работают в ночное время, при хорошей видимости [1–3].

Взаимная синхронизация бортовой шкалы времени (БШВ) космических аппаратов системы ГЛОНАСС по межспутниковым измерениям при автономном функционировании космических аппаратов (без связи с Землей) для потребителя не решает задачу привязки системной шкалы времени к шкале всемирного координированного времени UTC (SU).

Орбитальная групповая шкала времени имеет случайные уходы относительно UTC (SU), которые невозможно

определить без взаимодействия с наземными стандартами частоты.

Величина этих уходов изменяется, и для передачи потребителям информации с требуемой точностью необходимо периодически контролировать этот параметр наземными измерительными средствами.

Данная задача может решаться с использованием наземной лазерной системы, шкала времени которой синхронизирована со шкалой времени наземного стандарта частоты системы ГЛОНАСС [4].

Выполнение перспективных требований по точностным характеристикам (ТХ) эфемеридно-временной информации (ЭВИ) для космических аппаратов (КА) космических навигационных систем (КНС) на длительных интервалах автономного функционирования связано со значительным уменьшением погрешностей радиотехнических измерительных средств при определении дальностей между КА в орбитальной группировке, а также между КА и наземными измерительными средствами. Однако радиотехнические измерительные средства не могут полностью обеспечить решение задачи по достижению перспективных ТХ ЭВИ.

Кроме этого существуют определенные проблемы, продиктованные трудностями дальнейшего повышения точностных характеристик бортовых стандартов частоты.

Необходимо значительное изменение технологии решения эфемеридно-временной задачи (ЭВЗ), по сравнению с реализованными в настоящее время в КНС ГЛОНАСС и GPS, путем использования для решения указанной целевой задачи лазерных каналов для проведения измерений навигационных параметров и передачи информации между КА, а также между КА и наземными лазерными средствами.

Решение ЭВЗ в системе ГЛОНАСС для обеспечения высокой точности эфемеридно-временной информации, передаваемой потребителям в навигационном кадре, и необходимость метрологического обеспечения ЭВИ КА, радиотехнических бортовых и наземных измерительных средств возможно по технологии, основанной на использовании измерений дальности между КА, а между КА и наземными средствами – с помощью аппаратуры лазерных систем (ЛАС).

ЛАС могут играть и самостоятельную роль в обеспечении требуемых точностных характеристик эфемерид-

¹ Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

но-временного обеспечения (ЭВО) потребителей. В частности, использование наземных лазерных средств (НЛС) для высокоточных лазерных измерений дальности в любое время суток позволит существенно увеличить количество проводимых измерений и, следовательно, организовав для ЭВО устойчивый технологический цикл, обеспечить достижение высоких точностных характеристик ЭВО КА ГЛОНАСС и, соответственно, точности навигационных определений потребителей, что имеет принципиальное значение для обеспечения конкурентоспособности системы ГЛОНАСС в сравнении с GPS.

В этой связи задача по использованию лазерных линий для регулярного оперативного уточнения частотно-временной поправки (ЧВП) БШВ и взаимной синхронизации БШВ, с приведением частотно-временных поправок к БШВ КА к орбитальной групповой шкале времени системы ГЛОНАСС является весьма актуальной.

Применение ЛАС для межспутниковых дальномерных измерений с погрешностью не более 10 см позволит определять относительные сдвиги бортовых шкал времени КА с погрешностью не более 1 нс.

Основными функциями бортовых лазерных систем (БЛС) являются:

- измерения межспутниковых расстояний с сантиметровой точностью;
- передача измерительной и любой другой информации между КА;
- синхронизация бортовых шкал времени (БШВ) КА системы с наносекундной точностью;
- калибровка бортовой радиотехнической аппаратуры КА.

Физические принципы проведения измерений, осуществляемые БЛС и НЛС, обеспечивают потенциально высокие точностные характеристики измерения дальности между КА и определения расхождения их бортовых шкал времени.

Проведение сеансов измерений между БЛС и наземной лазерной системой (НЛС), использование результатов лазерных измерений дальности и обмен информацией для решения эфемеридно-временных задач позволят повысить точностные характеристики эфемерид КА и частотно-временных поправок к БШВ КА относительно системной шкалы времени КНС (СШВ).

Измерения дальности между БЛС КА могут обеспечить с наносекундной точностью определение расхождений между истинными значениями БШВ КА и прогнозируемыми значениями.

Межспутниковые измерения позволяют также преодолеть сокращение зоны наблюдаемости КА при региональном расположении наземных измерительных пунктов, обеспечить обмен между КА любой информацией и увеличить длительность интервала автономного функционирования КНС при сохранении требуемых точностных характеристик навигационного поля системы.

На борту КА устанавливаются два комплекта бортовой лазерной системы (БЛС), опорно-поворотные устройства (ОПУ) которых обеспечивают полный обзор нижней полусферы:

- углы поворота ОПУ относительно оси $OY_{опу}$ опорного поворотного устройства на начало и окончание каж-

дого сеанса взаимодействия БЛС КА-снайпера для наведения линии визирования на БЛС КА-мишени (назначаются в диапазоне от минус 90° до плюс 90°);

- углы поворота ОПУ относительно оси $OZ_{опу}$ опорного поворотного устройства на начало и окончание каждого сеанса взаимодействия БЛС КА-снайпера для наведения линии визирования на БЛС КА-мишени (назначаются в диапазоне от 0° до плюс 9°).

За счет наличия на борту КА двух комплектов БЛС, расположенных по оси Z с двух противоположных сторон КА, обеспечивается возможность взаимодействия БЛС КА одновременно с БЛС на двух КА.

Технические требования, предъявляемые к БЛС КА:

- среднее число лазерных импульсов, передаваемых в измерительно-связном сеансе – 200;
- скорость нацеливания линии визирования по каждой координате – 10 град/с;
- точность наведения линии визирования зависит от точности определения целеуказаний для БЛС КА-снайпера при нацеливании линии визирования на БЛС КА-мишени, погрешности приводов ОПУ и погрешности ориентации ОПУ БЛС относительно опорной системы координат. Определение угла поворота ОПУ относительно оси $OY_{опу}$ и угла поворота ОПУ относительно оси $OZ_{опу}$ опорного поворотного устройства на начало и окончание каждого сеанса взаимодействия для высокоточного наведения линии визирования используется эфемеридная информация, имеющаяся на борту КА;
- отработка угловых рассогласований приводами ОПУ БЛС должна быть не хуже 1 угл. мин;
- ширина диаграммы направленности лазерного передатчика не менее $\theta_{пер} = 10$ угл. мин;
- ширина диаграммы направленности лазерного приемника $\theta_{пр} = 1,5$ град;
- минимальный угол между линией визирования и вектором направления на Солнце – 30 град.;
- минимальный угол между линией визирования и вектором направления на центр Луны – 20 град.;
- минимальный угол между линией визирования и вектором направления на центр Земли – 20 град.;
- минимальный угол между линией визирования и вектором направления на любой элемент конструкции КА – 20 град.

Эфемериды КА известны с точностью, позволяющей определить направление линии визирования на КА-снайпера на КА-мишень с угловой погрешностью не хуже десяти угловых секунд.

Таким образом, точность наведения оптических блоков, кроме погрешностей отработки угловых рассогласований, погрешностей выставки оптических осей БЛС относительно ее приборной системы координат (ПСК) и ее юстировки относительно связанной системы координат (ССК) КА, существенно зависит и от погрешностей ориентации КА, включающих погрешности командных приборов системы ориентации и динамику процессов ориентации.

Использование для взаимного наведения БЛС системы координат КА в качестве опорной системы не позволит выполнить требования по точности наведения лазерного передатчика и лазерного приемника при проведении сеансов.

Повышение точности ориентации платформы ОПУ БЛС возможно при создании для БЛС опорной системы координат с помощью модуля астроориентиров (МАО), которые входят в состав БЛС. В качестве опорной системы координат назначается текущая инерциальная экваториальная геоцентрическая система координат.

Инерциальная экваториальная геоцентрическая система координат 2000 г. (ИЭГСК 2000) определяется следующим образом:

- центр СК находится в центре масс Земли;
- ось OX_r направлена в точку весеннего равноденствия, зафиксированную на 00:00:00 1 января 2000 г.;
- ось OZ_r перпендикулярна плоскости экватора, зафиксированной на 00:00:00 1 января 2000 г., и направлена в сторону Северного полюса Земли;
- ось OY_r дополняет систему координат до правой;
- S – звездное время на момент времени t_0 .

$$S = S_0 + 0,729\,211\,585 \cdot 10^{-4} t_0,$$

где ϵ_0 – средний наклон эклиптики к экватору; $C_{\text{РАД}} = 0,484\,813\,68 \cdot 10^{-5}$ – константа перевода из угловых секунд в радианы.

Рассчитываются вспомогательные параметры:

$$c_1 = (450\,160'', 280 - 696\,289\,0'', 539 \cdot T + 7'', 455 \cdot T^2) \cdot C_{\text{РАД}},$$

$$c_2 = (-286\,322'', 15 + 129\,602\,771'', 27 \cdot T + 1'', 089 \cdot T^2) \cdot C_{\text{РАД}},$$

$$c_3 = (128\,709\,9'', 804 + 129\,596\,581'', 224 \cdot T - 0'', 577 \cdot T^2) \cdot C_{\text{РАД}},$$

$$\Delta\psi = (-0,833\,860\,113\,705 \cdot 10^{-4} \sin c_1 + 0,999\,685\,8 \cdot 10^{-6} \sin 2c_1 - 0,639\,323\,8 \cdot 10^{-5} \sin 2c_2 + 0,691\,344\,308 \cdot 10^{-6} \sin c_3) \cos \epsilon_0.$$

Истинное гринвичское звездное время S_0 в 0^h гринвичского времени определяется по формуле

$$S_0 = 1,753\,368\,559\,233 + \\ + 0,017\,202\,791\,805\,25d + \\ + 0,677 \cdot 10^{-5} T^2 + \Delta\psi \cdot \cos \epsilon_0.$$

Звездное время S приводится к диапазону $[0 - 2\pi]$.

Рассчитываются координаты и вектор скорости НКА ГЛОНАСС в инерциальной текущей экваториальной геоцентрической системе координат по следующим формулам:

$$X_r = X_{\text{гр}} \cdot \cos S - Y_{\text{гр}} \cdot \sin S;$$

$$Y_r = X_{\text{гр}} \cdot \sin S - Y_{\text{гр}} \cdot \cos S;$$

$$Z_r = Z_{\text{гр}};$$

$$V_{X_r} = V_{X_{\text{гр}}} \cdot \cos S - V_{Y_{\text{гр}}} \cdot \sin S;$$

$$V_{Y_r} = V_{X_{\text{гр}}} \cdot \sin S + V_{Y_{\text{гр}}} \cdot \cos S;$$

$$V_{Z_r} = V_{Z_{\text{гр}}}.$$

Инерциальная текущая экваториальная геоцентрическая система координат (ИЭГСК) определяется следующим образом:

- центр СК находится в центре масс Земли;
- ось $OX_{\text{гт}}$ направлена в текущую точку весеннего равноденствия;
- ось $OZ_{\text{гт}}$ перпендикулярна текущей плоскости экватора и направлена в сторону Северного полюса Земли;
- ось $OY_{\text{гт}}$ дополняет систему координат до правой.

Модуль астроориентиров предназначен для следующего:

– определения трехосной ориентации приборной системы координат БЛС в инерциальной геоцентрической системе координат;

– выдачи вычислительному устройству (ВУ) информации о трехосной ориентации приборной системы координат БЛС относительно инерциальной геоцентрической экваториальной системы координат (ИГЭСК) – матрицы перехода от ИГЭСК к приборной системе координат БЛС;

– уточнения программного наведения и сопровождения ОПУ БЛС при выполнении сеансов взаимодействия.

Проведение сеансов измерений между БЛС и наземной лазерной системой будут практически отрабатываться на малом космическом аппарате «Юбилейный-2», на котором будет установлена аппаратура «Блик» (рис. 1). Прием и хранение телеметрии космического аппарата «Юбилейный-2» организовывается в Студенческом центре управления полетами Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева [5; 6].

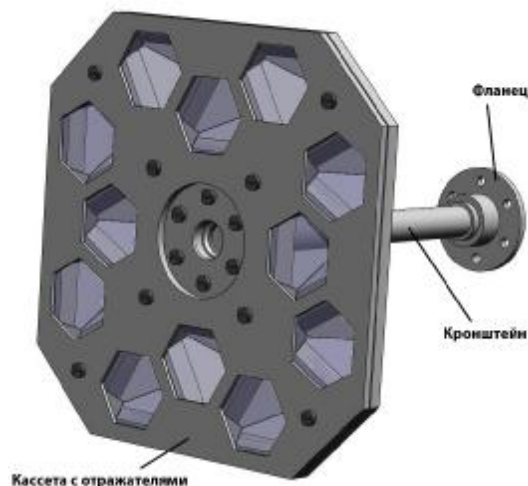


Рис. 1. Схема конструкции аппаратуры «Блик»

Температурные режимы определяют материал, из которого изготовлены отражающие призмы – плавленый кварц марки КУ-1 (кварц ультрафиолетовый), с улучшенной пропускной способностью в ультрафиолетовой части спектра (рис. 2).

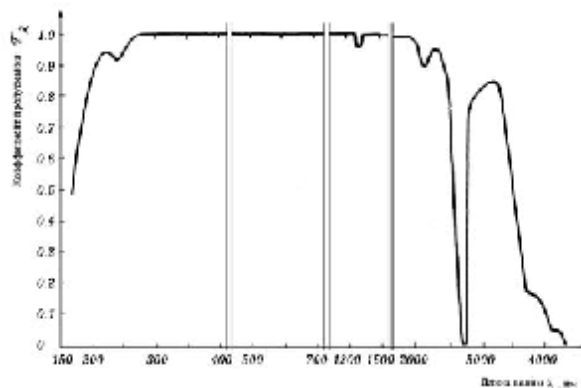


Рис. 2. Спектральная кривая коэффициента пропускания оптического кварцевого стекла марки КУ-1

Стекло марки КУ-1 – стекло кварцевое оптическое, прозрачное в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, с интенсивной полосой поглощения в интервале длин волн 170...250 нм, с заметной полосой поглощения в интервале 2 600...2 800 нм.

Масса устройства в сборе не более 700 г. Кассета для крепления отражателей изготовлена из алюминиевого сплава марки АМГ-6. Габаритные размеры деталей даны на рис. 3.

В настоящей статье не рассматриваются особенности модуля астроориентиров, принцип его функционирования, интерфейс с ОПУ и основные характеристики, а предлагается ограничиться только результатом его взаимодействия с ОПУ БЛС – создание для любого момента времени на каждом КА орбитальной группировки ГЛОНАСС инерциальной экваториальной геоцентрической системы координат и ее поддержание в течение штатного функционирования системы, что обеспечивает при выполнении сеансов измерений и обмена информацией по лазерной линии высокоточное взаимное наведение оптических осей лазерного передатчика КА-снайпера на фотоприемник лазерного излучения КА-мишени.

Библиографические ссылки

1. ГЛОНАСС. Принцип построения и функционирования / под ред. А. И. Петрова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2010.
2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. 5-я ред. М. : Военно-космические силы, 2002.
3. Карцан И. Н. Метод исключения ошибок определения местоположения при одновременном использовании навигационных систем // Вестник СибГАУ. 2008. № 3. С. 101–103.
4. Гречкосеев А. К., Почукаев В. Н. Исследование задачи определения эфемерид системы ГЛОНАСС по межспутниковым измерениям на основе орбитального кристалла [Электронный ресурс] // Труды МАИ : электрон. журн. 2009. № 34. URL: www.mai.ru/science/trudy.
5. Карцан И. Н. Наземный комплекс управления для малых космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2009. № 3. С. 89–92.
6. Жукова Е. С., Карцан И. Н. Обеспечение конфиденциальности информации в центре управления полетами // Вестник СибГАУ. 2009. № 3. С. 93–97.

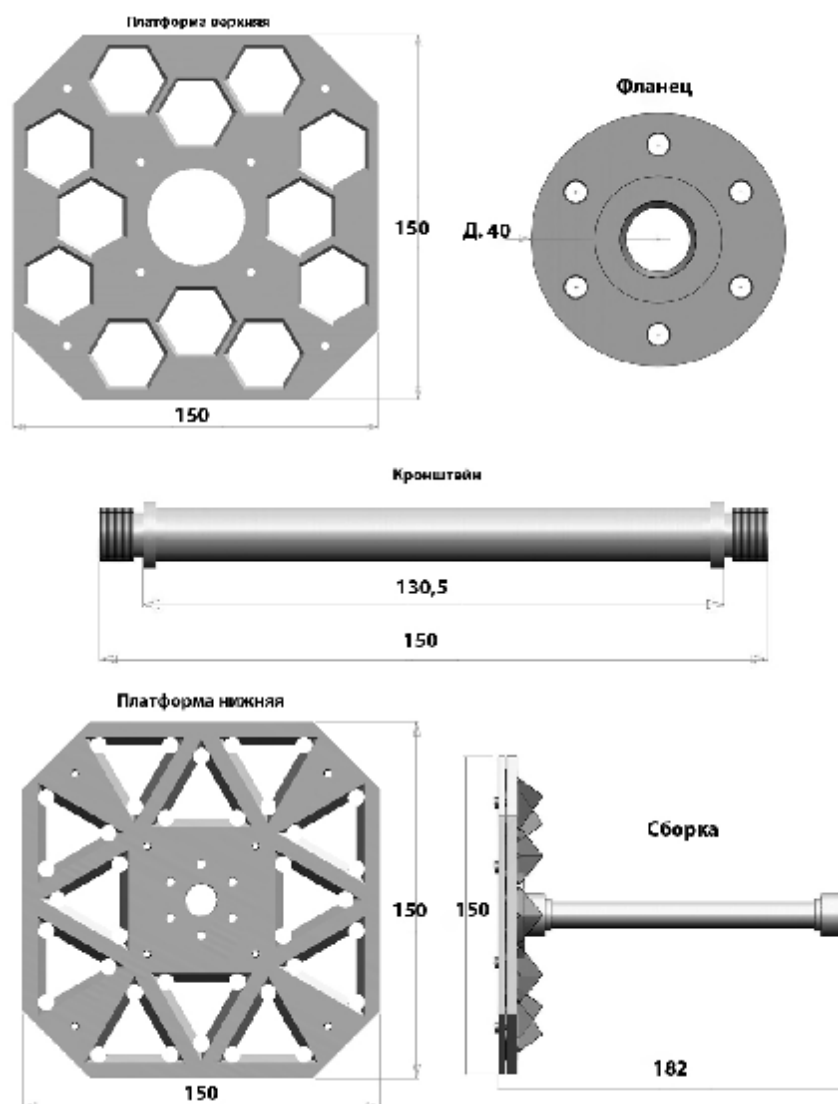


Рис. 3. Габаритные размеры деталей и сборки

I. N. Kartsan, E. S. Zhukova, S. V. Litoshik

CHARACTERISTIC FEATURES OF TARGETING VIA AIRBORNE LASER SPACE RADIO NAVIGATION DEVICES OF GLONASS SYSTEM

Characteristic features of usage of airborne laser systems for periodic adjustment of radio channels for range measurements of control stations of GLONASS satellite radio navigation system are considered in the article.

Keywords: airborne laser system, onboard control complex, ground control complex, radio frequency channel, the quantum-optical station.

© Карцан И. Н., Жукова Е. С., Литошик С. В., 2010

УДК 630.43:662.519.6

В. С. Коморовский, Г. А. Доррер

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ КАК ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Предлагается простая методика расчета параметров процесса распространения лесного пожара. Методика основана на представлении пожара в виде подвижного множества на поверхности Земли. Информационной базой предлагаемой методики служат данные космического мониторинга лесных пожаров.

Ключевые слова: космический мониторинг, динамические процессы, лесные пожары, прогнозирование.

Одной из областей, где требуется применение методов математического моделирования и теории управления, является охрана и рациональное использование природных ресурсов. Объекты, принадлежащие этой области, характеризуются, как правило, распределенностью в пространстве и зависимостью от большого числа трудно контролируемых факторов.

Особую группу составляют объекты, имеющие характер подвижных множеств или плоских волн на поверхности Земли. Примерами могут служить лесные и степные пожары, зоны загрязнения земной и водной поверхности, области, пораженные вредителями растений, зоны почвенной эрозии и опустынивания. Важность изучения таких объектов возрастает в связи с ростом антропогенной нагрузки на биосферу, процессами изменения климата.

Перечисленные объекты имеют разную физическую природу, различные пространственные и временные масштабы, но при определенных допущениях их динамика, в том числе процессы управления ими, могут быть описаны единым образом. Наиболее полно круг проблем, связанных с изучением этих процессов, актуальность таких исследований, их цели и задачи можно показать на примере лесных пожаров.

Задача охраны лесов от пожаров является весьма актуальной во всем мире в настоящее время. Так, в Российской Федерации по данным информационной системы дистанционного мониторинга федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) за пожароопасные сезоны 2008 и 2009 гг. произошло 35 337 пожаров, огнем

пройдено 15 565 510 га, в том числе 9 772 782 га покрытых лесом площадей [1]. Поскольку лес является одним из важнейших стратегических ресурсов, задача охраны лесов от пожаров, и в том числе моделирование и прогнозирование распространения пожаров, является чрезвычайно важной задачей. К настоящему времени разработано достаточное количество математических моделей распространения лесных пожаров и базирующихся на их основе методов прогнозирования. Эти модели и методы содержат разные подходы к рассмотрению процесса горения в природном пожаре, однако их общей особенностью является высокая требовательность к информационному обеспечению моделирования, т. е. условием построения адекватной модели и, соответственно, прогноза, является точное знание множества характеристик местности, на которой происходит пожар, состояния растительных горючих материалов, погодных условий. На текущий момент создать информационную базу для обеспечения построения прогнозов на основе таких моделей в России не представляется возможным.

Наиболее полная информация о лесопожарной обстановке на данный момент содержится в ИСДМ-Рослесхоз. Эта информационная система существует и развивается с 1995 г. Источниками информации, представленной в ИСДМ-Рослесхоз, являются данные космического, авиационного и наземного мониторинга лесных пожаров. Причем, ввиду обширности зон наблюдения, методы космического мониторинга играют ведущую роль. В сборе данных участвуют спутники серий NOAA, TERRA, AQUA, SPOT, LANDSAT ETM+, МСУ-Э [1].